Вестник Донского государственного технического университета. 2020. Т. 20, № 1. С. 42–50. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006
Vestnik of Don State Technical University. 2020. Vol. 20, no. 1, pp. 42–50. ISSN 1992-5980 eISSN 1992-6006



УДК 621.791.01:621.643.053 https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-42-50



Пути решения проблем оперативного прогнозирования качества сварных соединений магистральных трубопроводов



А. Е. Филяков[1], М. А. Шолохов[2]
[1] ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (г. Москва, Российская Федерация)
[2] ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», (г. Екатеринбург, Российская Федерация)

Введение. Так как при строительстве магистральных трубопроводов сварка является единственным способом соединения отдельных труб в непрерывную нитку, то современные системы управления качеством продукции сварочного производства основаны на минимизации вероятности появления характерных дефектов. Это достигается мониторингом и документированием сварочных работ.
Материалы и методы. Проведенный анализ систем мониторинга процессов ручной, механизированной и автоматической орбитальной сварки показал, что промышленность остро нуждается в системах, не просто контролирующих и документирующих процесс сварки, но и прогнозирующих качество сварных соединений. Это актуализирует необходимость разработки интеллектуального модуля, который смог бы на основании результатов мониторинга в режиме реального времени оперативно прогнозировать качество сварных соединений.
Результаты исследования. Так как теоретическая связь результатов прогнозирования с показателями качества шва характеризуется взаимодействием значительного количества физических явлений, протекающих во времени, то результаты процесса сварки могут быть описаны только достаточно полной нестационарной физико-математической моделью сварочного процесса. Однако с целью возможности прогнозирования результатов процесса сварки непосредственно при их мониторинге предлагается упрощенная модель прогнозирования, главной особенностью которой является возможность синхронного выполнения расчётов с реальным процессом, что реализуется в цикле реального времени с заданным шагом.
Обсуждение и заключения. Главным препятствием успешного функционирования модуля оперативного прогнозирования, помимо длительности численного решения уравнений модели, является погрешность оценки. Чтобы обеспечить минимальную погрешность виртуального воспроизведения при упрощении необходимо провести комплексные исследования значимости отдельных факторов и явлений на показатели качества. Эти соображения определили содержание и последовательность работ по созданию и внедрению интеллектуального модуля оперативного прогнозирования качества сварки. Несомненно, что информация по прогнозированию качества сварных соединений должна поступать в систему управления качеством трубопроводов более высокого уровня, а также анализироваться строительными организациями с целью выработки профилактических мер по совершенствованию организации и выполнению сварочных работ.

Ключевые слова: сварка, прогнозирование качества, сварочные работы, сварное соединение, магистральный трубопровод, физико-математическая модель.

Образец для цитирования: Филяков, А. Е. Пути решения проблем оперативного прогнозирования качества сварных соединений магистральных трубопроводов / А. Е. Филяков // Вестник Донского государственного технического. — 2020. — Т. 20, №1. — С. 42−50. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-42-50



On solving problems of operational forecasting of main pipeline weld joint quality

A. E. Filyakov[1], M. A. Sholokhov[2]
[1] Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russian Federation)
[2] Yeltsin UrFU, (Ekaterinburg, Russian Federation)

Introduction. Since welding is the only means to connect pipe lengths into a continuous line when constructing main pipelines, modern quality management systems for the welding industry products are based on minimizing the occurrence of specific defects. This is achieved through monitoring and documenting welding procedures.
Materials and Methods. The analysis of monitoring systems customized for manual, mechanized and automatic orbital welding has shown that the industry urgently needs systems that not only control and document the welding process, but also predict the quality of weld joints. This actualizes the need to develop an intelligent module that could, basing on real-time monitoring results, predict the quality of welded joints on the fly.
Results. Since the theoretical connection between the forecasting results and weld quality attributes is characterized by the interaction of a significant number of physical phenomena continuous in time, the results of welding can be described only by a sufficiently complete nonstationary physicomathematical model of the welding process. However, in order to be able to predict the results of welding directly during the monitoring of the process, a simplified forecasting model is proposed whose key feature is the ability to perform calculations synchronously with the real process, which is implemented in a real-time mode with a given interval.
Discussion and Conclusions. The major obstacle to the successful functioning of the operational forecasting module, apart from the length of the numerical solution of equations, is an estimation error. To ensure the minimum error of virtual display during simplification, it is necessary to conduct comprehensive studies of the significance and influence of individual factors and phenomena on quality attributes. These observations determined the content and sequence of work on the creation and implementation of an intelligent module for the operational forecasting of welding quality. Undoubtedly, the information on the forecasting of the weld joint quality should enter a higher-level pipeline quality management system, as well as be analyzed by construction organizations in order to develop preventive measures to improve the organization and performance of welding work.
Introduction. Since welding is the only means to connect pipe lengths into a continuous line when constructing main pipelines, modern quality management systems for the welding industry products are based on minimizing the occurrence of specific defects. This is achieved through monitoring and documenting welding procedures.
Materials and Methods. The analysis of monitoring systems customized for manual, mechanized and automatic orbital welding has shown that the industry urgently needs systems that not only control and document the welding process, but also predict the quality of weld joints. This actualizes the need to develop an intelligent module that could, basing on real-time monitoring results, predict the quality of welded joints on the fly.
Results. Since the theoretical connection between the forecasting results and weld quality attributes is characterized by the interaction of a significant number of physical phenomena continuous in time, the results of welding can be described only by a sufficiently complete nonstationary physicomathematical model of the welding process. However, in order to be able to predict the results of welding directly during the monitoring of the process, a simplified forecasting model is proposed whose key feature is the ability to perform calculations synchronously with the real process, which is implemented in a real-time mode with a given interval.
Discussion and Conclusions. The major obstacle to the successful functioning of the operational forecasting module, apart from the length of the numerical solution of equations, is an estimation error. To ensure the minimum error of virtual display during simplification, it is necessary to conduct comprehensive studies of the significance and influence of individual factors and phenomena on quality attributes. These observations determined the content and sequence of work on the creation and implementation of an intelligent module for the operational forecasting of welding quality. Undoubtedly, the information on the forecasting of the weld joint quality should enter a higher-level pipeline quality management system, as well as be analyzed by construction organizations in order to develop preventive measures to improve the organization and performance of welding work.

Keywords: welding, quality forecasting, welding procedures, weld joint, main pipeline, physical and mathematical model

For citation: A. E. Filyakov. On solving problems of operational forecasting of main pipeline weld joint quality. Vestnik of DSTU, 2020, vol. 20, no. 1, pp. 42−50. https://doi.org/10.23947/1992-5980-2020-20-1-42-50

Введение. Последовательное развитие инфраструктуры нефтегазовой отрасли требует постоянного совершенствования трубопроводных систем, так как трубопроводный транспорт в настоящее время наиболее предпочтителен для транспортировки углеводородного сырья и продуктов его переработки. Известно, что на

современном этапе развития технологии строительства магистральных трубопроводных систем сварка является единственным способом соединения отдельных труб в непрерывную нитку непосредственно на трассе.

С учетом последствий аварий и отказов в работе, магистральные трубопроводы относятся к категории опасных производственных объектов. Так как по данным Ростехнодзора свыше 85% аварий и катастроф на объектах происходит из-за разгерметизации или отказа сварных соединений, то весьма актуальна проблема обеспечения качества сварных соединений. Поэтому качество проведения сварочных работ является основой безопасной эксплуатации любой трубопроводной транспортной системы [1].

Качество сварного шва оценивают размерами его поперечного сечения, механическими свойствами металла шва и зоны термического влияния (ЗТВ), распределением напряжений и остаточных деформаций, вероятностью возникновения холодных и горячих трещин, наличием пор, несплавлений и др. дефектов. Современные системы управления качеством продукции сварочного производства основаны на минимизации вероятности появления характерных дефектов. Для этого проводят организационно-технические мероприятия по подготовке и реализации процессов сварки. Такой подход способствует не только повышению качества сварных соединений, но и совершенствованию сварочных технологий, рациональному выбору сварочных материалов, развитию методов контроля процессов сварки. В этой связи рассмотрим подробнее основные сварочные технологии, применяемые при строительстве трубопроводов.

Материалы и методы. В настоящее время наиболее часто используемым методом соединения труб магистральных трубопроводов в нитку является дуговая сварка плавлением. При строительстве трубопроводов применяют ручную, механизированную и автоматическую сварку. Ручная дуговая сварка характеризуется простотой реализации, мобильностью оборудования, однако она достаточно трудоемка и требует большого количества квалифицированных кадров. Кроме того, при ручной дуговой сварке возможно возникновение значительного количества дефектов. Механизированная (полуавтоматическая) сварка трубопроводов, по сравнению с ручной дуговой сваркой, более производительна. Однако и она не лишена недостатков, главные из которых — повышенное разбрызгивание электродного металла, проблемы газовой защиты, выделение аэрозолей, особенно при сварке самозащитной порошковой проволокой. Следует отметить, что способы ручной и механизированной сварки характеризуются высокой степенью субъективного влияния исполнителей. Менее значим «человеческий фактор» для автоматических способов сварки. Однако автоматическая орбитальная сварка, в сравнении с ручной и механизированной сваркой, менее мобильна. В настоящее время среди установок для автоматической орбитальной сварки следует выделить оборудование для сварки плавящимся электродом с управляемым каплепереносом электродного металла [2]. Для снижения влияния характерных возмущений весьма перспективно применение адаптивных технологий, оперативно корректирующих процесс сварки [3].

Среди расходных материалов, широко применяемых для автоматической и механизированной сварки, можно выделить газозащитные порошковые проволоки. Самозащитные проволоки, несмотря на целый ряд преимуществ, применяются в значительно меньших объемах.

В последние годы активизировались попытки внедрения при строительстве более производительных технологий автоматической сварки, например, плазменной, лазерной, контактно-стыковой, а также сварки с сочетанием различных источников нагрева [4]. Однако все эти способы сварки пока не нашли промышленного применения или используются в крайне ограниченных объемах. Внедрение автоматических сварочных процессов снижает влияние человека на качество сварных соединений. Однако вопросам, касающимся выполнения сварщиком или оператором сварочного оборудования предписанных требований и инструкций по производству работ, уделяется пристальное внимание.

В настоящее время процедуры мониторинга сварочных работ стали составной частью научно-технического сопровождения строительства магистральных трубопроводов. Процедуры мониторинга обеспечивают наблюдение за энергетическими параметрами процессов сварки, предупреждение и профилактику причин несоответствия сварных соединений требованиям нормативно-технической документации (НТД), контроль их устранения. Одновременно процедуры мониторинга позволяют реализовать ряд требований по документированию выполняемых работ. Это достигается подключением к современному сварочному оборудованию специальных регистраторов с соответствующим программным обеспечением [5].

Типовая схема функционирования подобных систем представлена на рис. 1.

Разработкой подобных систем мониторинга, регистрации и документирования параметров процесса сварки занимается целый ряд отечественных высокотехнологичных наукоемких предприятий. Системы могут быть встроены в современные цифровые источники сварочного тока или изготовлены в виде отдельных блоков.

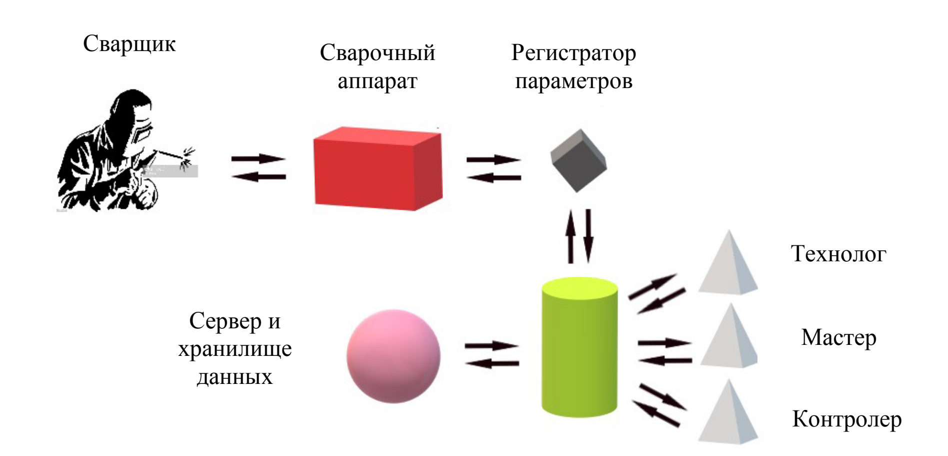


Рис. 1. Информационные потоки мониторинга процессов сварки

При мониторинге процесса дуговой сварки для регистрации параметров авторами работы [6] была разработана многопостовая (до 64 сварочных постов) регистрирующая система измерения, отображения и сохранения данных о токе сварки, напряжении на дуге и температуры свариваемых деталей. Регистраторы такой системы могут располагаться на расстоянии до 300 м от места установки персонального компьютера со специализированным программным обеспечением (ПО).

Схожие решения используются и другими разработчиками систем документации процессов сварки, например, предприятиями «Шторм», «НПФ ИТС», «Тэлма», «Эллой» и др. Система мониторинга и контроля «Weld Telecom», разработанная компанией «Эллой», обеспечивает поступление информации как с единичного поста, так и с целого парка сварочного оборудования через удаленный сервер с использованием проводной или беспроводной сети Wi-Fi. Такие возможности системы Weld Telecom обеспечивают наблюдение за выполняемыми сварщиками технологическими операциями и контроль технического состояния сварочного оборудования. Причем система позволяет как наблюдать за процессом, так и передавать команды по корректировке режимов сварки, что следует считать значимым шагом в реализации концепции Industry 4.0 с помощью датчиков и сетей. Помимо этого, система обеспечивает документирование процессов сварки с автоматизацией сбора, систематизации и хранения информации для формирования паспортов свариваемых изделий и использования их при управлении качеством продукции. Возможности системы «Weld Telecom» по обработке и визуализации параметров режима сварки приведены на рис. 2.

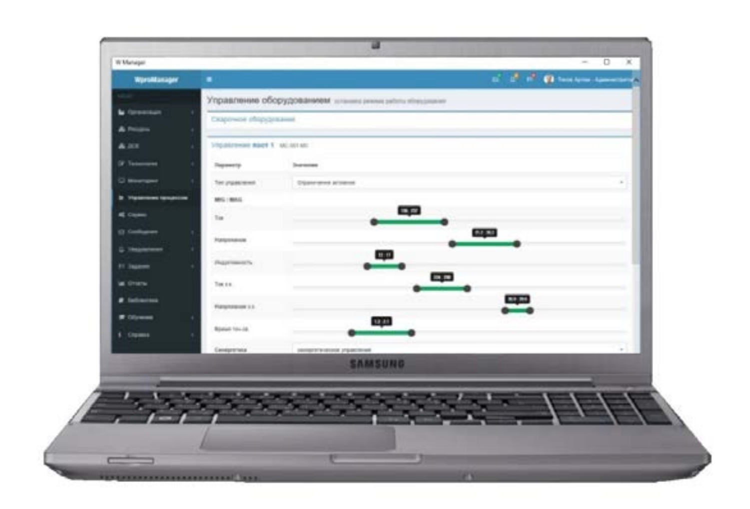


Рис. 2. Возможности системы «Weld Telecom» по визуализации параметров

Активно занимаются разработкой систем регистрации и документирования процессов сварки и зарубежные разработчики и производители сварочного оборудования. Подобные российским компаниям решения по регистрации параметров процесса сварки демонстрируют фирмы Fronius (Австрия), Kemppi (Финляндия), Miller Electric (США) и целый ряд других зарубежных компаний.

Следует отметить, что несколько бóльшими возможностями обладают системы мониторинга и контроля Production Monitoring компании Lincoln Electric (США) и Merkle Quality Control компании Merkle Group

Inc (США). Эти системы не просто осуществляют мониторинг и регистрацию параметров процесса сварки, но выявляют и регистрируют данные об их отклонениях [7]. Система Production Monitoring в режиме on-line сравнивает заранее заданные пользователем значения напряжения, тока, скорости подачи электродной проволоки, временного интервала процесса сварки с фактическими значениями. Система Merkle Quality Control обеспечивает документирование и контроль до 8 параметров процесса механизированной сварки с возможностью их архивации. Такие возможности системы фиксации отклонений обеспечивают независимые сенсоры тока, напряжения, проволоки и газа. Однако такие системы устойчиво работают только с оборудованием собственной разработки.

Поэтому можно констатировать, что наиболее популярные системы мониторинга процессов сварки используются для документирования их параметров, а также для анализа расхода материалов, использования рабочего времени, регистрации выхода параметров за пределы допусков, дисциплинирования сварщиков. Однако ни одна из систем не отвечает на главный вопрос — к каким последствиям приведут выявленные отклонения. С учетом ввезженного, нужны системы, не только контролирующие и документирующие процесс сварки, но и прогнозирующие его результаты. Следует отметить, что, несмотря на попытки прогнозировать качество сварных соединений по результатам мониторинга параметров процессов сварки, предпринятые как в начале нынешнего столетия [8], так и позднее [9], систем оперативного прогнозирования качества непосредственно на месте выполнения сварочных работ на сегодняшний день попросту не существует. Все это актуализирует необходимость разработки интеллектуального модуля, который смог бы оперативно прогнозировать качество сварных соединений. Однако создать такой модуль можно только связав показатели качества сварных соединений с фактическими параметрами режима сварки, регистрируемыми в режиме on-line.

Обсуждение и заключения. К сожалению, теоретическая связь результатов прогнозирования с показателями качества шва характеризуется взаимодействием значительного количества физических явлений, протекающих во времени, так как именно они определяют подвод тепла, условия формирования и кристаллизации сварочной ванны, размеров шва и микроструктуры ЗТВ [10]. Однако представление процессов сварки в виде сложных, многофакторных систем позволяет использовать при их исследовании математическое моделирование. Наиболее просто собрать необходимые для прогнозирования данные в стационарных цеховых условиях [11]. Однако в условиях трассы сложно замерить целый ряд параметров процесса ручной и механизированной сварки. Например, перемещения руки сварщика и параметры колебаний электрода в разделке при ручной или механизированной сварке являются неконтролируемыми величинами. О них можно судить только по косвенным признакам.

Нельзя не учитывать влияние на качество формирования сварного шва сборки стыка, так как даже принятые отделом технического контроля (ОТК) собранные стыки будут иметь отклонения в пределах допуска. Если при автоматической орбитальной сварке для определения реального профиля свариваемых кромок можно использовать сканирующие лазерно-телевизионные системы [12], то при ручной и механизированной сварке применить их достаточно сложно. Поэтому прогнозирование качества ручной и механизированной сварки только по результатам обработки фактических значений энергетических параметров процесса может носить только оценочный, приближенный характер. Для повышения достоверности такого прогноза необходимы реальные данные о распределении размеров разделки кромок по стыку трубопровода. В тех случаях, когда применять лазерно-телевизионное сканирование невозможно, нужно использовать другие технологические приемы. Так, если пренебречь изменением зазора в ходе сварки вследствие теплового расширения и деформации металла, то мониторинг сборки стыка в ходе сварки можно заменить измерением его размеров до начала сварки. Так как величина зазора относительно медленно меняется вдоль стыка, то достаточно выполнить измерение в нескольких точках, а остальные размеры стыка определять интерполяцией имеющихся результатов. Есть ещё одна возможность повышения достоверности прогноза, когда учет параметров сварки затруднен. Можно учитывать их возможный разброс (например, допуск на диаметр проволоки, возможные вариации скоростей сварки и подачи проволоки, зазора в стыке и т. п.). Однако в этом случае на результат моделирования достаточно сложно наложить отклонения от нестабильности тех параметров, которые не измеряют.

Следует отметить, что вследствие флуктуаций параметров сварочного процесса показатели качества швов неравномерно распределяются как по длине, так и по толщине сваренного стыка. Поэтому конечной задачей модуля прогнозирования качества соединений является выявление именно тех участков шва, на которых вероятность ухудшения показателей качества критически высока. Очевидно, что столь сложная связь показателей качества с получаемыми результатами требует использования современных инструментов прогнозирования.

С учетом этого, прогнозируемые результаты могут быть описаны только динамической (нестационар-

ной) физико-математической моделью. Принимая во внимание проблемы фиксации расширенного набора параметров, в модели должны использоваться приемы суррогатной оптимизации [13]. С учетом этих соображений, на рис. 3 приведена структура динамической физико-математической модели, используемой в составе модуля оперативного прогнозирования качества сварных соединений по минимальному числу анализируемых параметров.

Ввод данных:
материалы, тип стыка, номинальные параметры сварки и вероятные допуски на их значение.
Чтение баз данных:
Определение исходного термодинамического состояния.

Базы данных
по свойствам материалов, стандартных размеров стыка и шва.

Цикл реального времени

Учет формы и разделки кромок стыка

Внутренний итерационный цикл

Моделирование сварочного процесса:
- определение расположения дуги и распределения её мощности по поверхности стыка и сварочной ванны;
- определение распределения температур и размеров сварочной ванны;
- определение деформации поверхности сварочной ванны.

Ввод данных мониторинга:
- положение сварки,
- текущие размеры разделки,
- ток и напряжение дуги.

пока не достигнуто равновесное состояние поверхности сварочной ванны

Определение текущих значений размеров поперечного сечения и химического состава металла шва, его структуры и механических свойств.

Расчёт текущих значений напряжений и деформаций.

Оценка соответствия геометрии стыка и критериев качества шва нормативным требованиям.

База требований
к качеству продукции

Прогноз вероятности дефектов и вывод предупреждающих сообщений в ходе выполнения прохода.

пока не завершена сварка прохода шва

Вывод протокола о результатах прогнозирования вероятности возникновения дефектов в проходах свариваемого шва

Рис. 3. Структура физико-математической модели для прогнозирования результатов процессов сварки в составе интеллектуального модуля

Перед выполнением сварки в программу вводится информация о процессе: тип соединения и форма разделки, толщины свариваемых деталей, марка стали, марка и диаметр электродной проволоки, защитный газ, а также рекомендуемые режимы сварки. В дальнейшем эта информация приводится в паспортах на сваренные стыки, где также содержатся данные о номере стыка, серийном номере сварочного оборудования, фамилии сварщика, времени начала и окончания процесса сварки стыка.

Особенностью модели для выполнения прогноза качества в ходе сварки является необходимость синхронного с реальным процессом проведения расчетов, что реализуется в цикле реального времени с заданным шагом, определяемым по инерционности сварочной ванны. Поэтому он должен быть меньше длительности изменения глубины кратера на поверхности ванны при изменении тока дуги. Моделирование термодинамического состояния стыка должно осуществляться на каждом шаге реального временного цикла, так как важной особенностью дуговой сварки, помимо возможности заглубления дуги в кратер сварочной ванны, является изменение ее объема. С учетом этого, энергетический и массовый баланс должен быть достигнут за время, не превышающее выбранный шаг. По термодинамическому состоянию металла несложно определить размеры сварочной ванны, термический цикл сварки и химический состав шва, что позволяет выполнить расчёт количества структурных составляющих и оценить механические свойства металла шва и ЗТВ. Кроме того, известными методами [14] можно рассчитать напряжения и деформации в окрестности сварочной ванны.

Такие решения позволяют оценить не только возможность появления горячих трещин, но и по резуль-

татам расчета количества мартенсита, склонности металла шва и ЗТВ к холодным трещинам.

Встраивание физико-математической модели в компьютерную программу модуля оперативного прогнозирования позволяет оценивать вероятность возникновения дефектов непосредственно в ходе сварки (рис. 4).

Для достоверности результатов необходимо, чтобы скорость виртуального воспроизведения процесса была больше его реального течения. Поэтому главным препятствием успешного функционирования модуля оперативного прогнозирования является длительность численного решения уравнений физико-математической модели. Это обстоятельство вынуждает упростить как саму модель, так и её численную реализацию. Упрощение модели может быть достигнуто ограничением области её применения (специализацией), а также уменьшением количества измеряемых параметров и определяемых показателей качества. Однако, чтобы уменьшить погрешность виртуального воспроизведения при подобном упрощении, необходимо провести комплексные исследования по оценке влияния отдельных факторов и явлений на показатели качества сварных соединений.

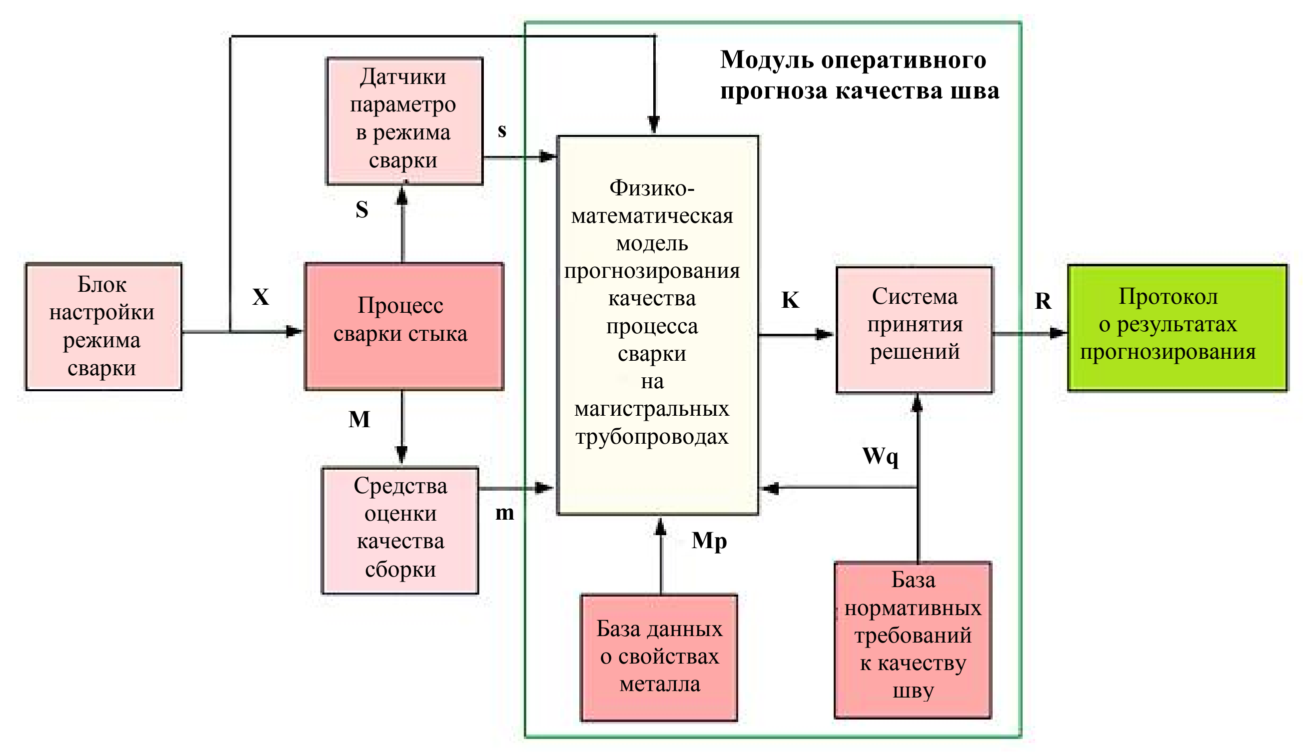


Рис. 4. Структура системы прогнозирования результатов процесса сварки:
X — заданные параметры сварочного процесса; S — контролируемые параметры сварочного процесса;
s — результаты измерения параметров сварки;
M — данные о геометрии, качестве сборки и пространственном положении стыка;
m — результаты измерений; Mp — данные о физических свойствах свариваемого металла;
Wq — нормативные данные о требованиях к качеству сварного шва;
Sp — база сравнения параметров режима; K — информационный поток;
R — сигнал результатов сопоставления качества шва нормативным требованиям

Разумеется, что структура интеллектуального модуля прогнозирования результатов процесса сварки, его программное обеспечение будут уточнены и скорректированы по результатам опытно-промышленного использования при оперативном прогнозировании качества сварных соединений непосредственно при выполнении сварочных работ.

Необходимый комплекс работ по созданию и внедрению интеллектуального модуля оперативного прогнозирования качества сварки и последовательность их выполнения представлены на рис. 5.



Рис. 5. Содержание и последовательность работ по созданию и внедрению интеллектуального модуля оперативного прогнозирования качества сварки

Для диагностирования технического состояния магистральных трубопроводов необходимо собрать всю доступную информацию об объекте. Для этого информация по прогнозированию качества сварных соединений должна поступать в систему управления качеством трубопроводов более высокого уровня, например, в систему комплексного диагностического мониторинга линейной части магистральных газопроводов [15], либо в систему анализа информации о состоянии элементов нефтепроводов [16, 17]. Строительным организациям важна информация не только о дефектах сварных соединений, но и о причинах их возникновения. Поэтому информация оперативного прогнозирования качества сварных соединений должна анализироваться строительными организациями с целью выработки профилактических мер по совершенствованию организации и выполнению сварочных работ. Такой анализ целесообразно осуществлять в стационарных условиях, с включением в структуру модуля прогнозирования более полной компьютерной модели сварочного процесса и накопителя информации с соответствующими фильтрами. Однако и этот подход нуждается в дополнительном исследовании значимости отдельных факторов и явлений на показатели качества. Только тогда информация оперативного прогнозирования качества сварных соединений станет по настоящему эффективным инструментом принятия профилактических мер по предупреждению и устранению причин брака.

Выводы

1. Предложен метод обработки данных мониторинга процесса сварки с использованием детерминированной физико-математической модели, обеспечивающей достаточно точный прогноз качества сварных соединений непосредственно в ходе сварки, на основе взаимосвязей между параметрами режима и нормируемыми показателями качества соединений.

2. Оперативное прогнозирование обеспечивает специальный интеллектуальный модуль, в программное обеспечение которого входит компьютерная программа реализации физико-математической модели оперативного прогнозирование качества сварных соединений.

3. Так как главным препятствием использования предложенного метода оперативной обработки данных являются высокие требования к скорости решения уравнений модели, то для обеспечения высокой скорости виртуального воспроизведения процесса сварки предлагается провести комплексные исследования значимости отдельных факторов и явлений на показатели качества. Эти соображения определили содержание и последовательность работ по созданию и внедрению интеллектуального модуля оперативного прогнозирования качества сварки.

Библиографический список

1. Мустафин, Ф. М. Современные технологии сварки трубопроводов: учебное пособие / Ф. М. Мустафин, Н. Г. Блехерова, Л. И. Быков. — Санкт-Петербург : Недра, 2010. — 560 с.

2. Опыт разработки и применения современных отечественных технологий и оборудования для автоматической орбитальной сварки магистральных газопроводов / О. Б. Гецкин [и др.] // Сварка и Диагностика. — 2010. — № 6. — С. 51–57.

3. Реализация адаптивных технологий сварки кольцевых стыков магистральных трубопроводов / Н. П. Алешин [и др.] // Сварка и Диагностика. — 2011. — № 5. — С. 49–53.

4. Алешин, Н. П. Современные способы сварки: учебное пособие / Н. П. Алешин, В. И. Лысак, В. Ф. Лукьянов. — Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2011. — 58 с.

5. Гладков, Э. А. Регистратор параметров сварки / Э. А. Гладков // Сварочное производство. — 2000. — № 3. — С. 46–47.

6. Гаврилов, А. И. Видеокомпьютерные технологии построения компактных моделей протяженных сварных швов в системах автоматизированного мониторинга качества при строительстве магистральных трубопроводов / А. И. Гаврилов, Э. А. Гладков, Р. А. Перковский // Сварка и Диагностика. — 2014. — № 1. — С. 57–61.

7. Kuvin, B. F. Captured: Real-Time welding data to optimize quality, efficiency / B. F. Kuvin, L. A. Kren // MetalForming magazine. — 2016. — Vol. 50, no. 3. — P. 40–43.

8. On-line quality monitoring in short-circuit gas metal arc welding / S. Adolfsson [et al.] // Welding Journal. - 1999. — Vol. 78, no. 2. — P. 59s–73s.

9. Monitoring and control of penetration in GTAW and pipe welding / X. R. Li [et al.] // Welding Journal. — 2013. — Vol. 92, no. 6. — P. 190s–196s.

10. Choi, J. H. Simulation of dynamic behavior in a GMAW system / J. H. Choi, J. Y. Lee, C. D. Yoo // Welding Journal. — 2001. — Vol. 80, no. 10. — P. 239s–245s.

11. Control of the weld quality using welding parameters in a robotic welding process / M.-H. Park [et al.] // Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. — 2018. — Vol. 87, no. 1. — P. 32–40.

12. Булычев, В. В. Способы и средства мониторинга и автоматизации сварочных процессов: учебное пособие / В. В. Булычев. — Калуга : Манускрипт, 2018. — 44 с.

13. Leifsson, L. Surrogate modelling and optimization using shape-preserving response prediction: a review / L. Leifsson, S. Koziel // Journal Engineering Optimization. — 2015. — Vol. 48, no. 3. — P. 476–496.

14. Determination of welding parameters for shielded metal arc welding / U. Soy [et al.] // Scientific Research and Essays. — 2011. — Vol. 6, no. 15. — P. 3153–3160.

15. Харионовский, О. В. Мониторинг объектов линейной части магистральных газопроводов / О. В. Харионовский // Территория Нефтегаз. — 2009. — № 4. — С. 22–25.

16. Лисин, Ю. В. Мониторинг магистральных нефтепроводов в сложных геологических условиях / Ю. В. Лисин, А. А. Александров // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2013. — № 2. — С. 22–27.

17. Создание, внедрение и сопровождение архива электронных копий и оцифрованных данных трассы магистрального нефтепровода / В. И. Суриков [и др.] // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. — 2015. — № 4. — С. 52–60.

Сдана в редакцию 14.01.2020
Запланирована в номер 05.03.2020

Об авторах:

Филяков Алексей Евгеньевич, аспирант, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана» (105005, РФ, Москва, 2-я Бауманская ул., 5/1), ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9051-7078 , filyakov.92@mail.ru

Шолохов Михаил Александрович, заведующий кафедрой «Автоматизация и роботизация сварочного производства», ФГАОУ ВО «УрФУ имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (620002, РФ, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7666-5645, uni@shtorm-its.ru

Заявленный вклад соавторов

А. Е. Филяков — постановка цели и задач исследования, проведение литературного анализа, подготовка текста, формирование выводов; М. А. Шолохов — научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.